

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.01.008

# 探出式蔬菜钵苗打孔移栽机构优化设计与试验

周脉乐<sup>1,2</sup> 薛向磊<sup>1,2</sup> 钱孟波<sup>3</sup> 尹大庆<sup>1,2</sup>

(1. 东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030; 2. 东北农业大学北方寒地现代农业装备技术重点实验室, 哈尔滨 150030;  
3. 浙江农林大学工程学院, 杭州 311300)

**摘要:** 针对回转式蔬菜钵苗打孔移栽机构破坏钵体完整性、穴口不对称造成栽植直立度差、打孔和栽植过程同时进行影响栽植质量等问题,提出了一种探出式蔬菜钵苗打孔移栽机构。该机构可交替实现打孔和栽植过程,移栽臂栽植时,打孔器在前一株钵苗栽植位置完成打孔,保证了栽植时序且穴口对称,土壤回流均匀,有利于保证栽植直立性。在取苗位置执行探出式夹取苗钵动作,以保护苗钵基质的完整性。基于探出式蔬菜钵苗打孔移栽机构的运动学机理分析开发了优化设计软件,并完成了优化设计。开展了移栽机构的虚拟仿真试验和系列台架试验,分析了在取苗、打孔和栽植等关键位置的位姿。轨迹与位姿验证试验表明,该机构形成的特定轨迹和位姿可依次完成取苗、输送、打孔和栽植等动作。取苗试验表明,该机构可实现探出式取苗,有效保证了蔬菜钵苗基质的完整性。

**关键词:** 种植机械; 蔬菜钵苗; 打孔移栽机构; 探出式

中图分类号: S223.94 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)01-0077-07

OSID:



## Optimal Design and Experiment of Potted Vegetable Seedling Transplanting Mechanism with Punching Hole

ZHOU Maile<sup>1,2</sup> XUE Xianglei<sup>1,2</sup> QIAN Mengbo<sup>3</sup> YIN Daqing<sup>1,2</sup>

(1. College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

2. Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology in North Cold Region, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

3. College of Engineering, Zhejiang Agricultural and Forestry University, Hangzhou 311300, China)

**Abstract:** In order to solve the problems that the integrity of the pot destroyed by the transplanting mechanism, the poor perpendicularity of planting caused by the asymmetry of the hole, and the poor quality of planting caused by the process of punching and planting, a kind of potted vegetable seedling transplanting mechanism with punching hole was put forward. The process of punching and planting could be alternately implemented by the mechanism. The punching process at the planting position of the previous potted seedling was completed by the puncher when a seedling was planted by the transplanting arm, which ensured the planting sequence. The holes formed by the puncher were symmetrical, the soil reflux was even and conducive to ensure the perpendicularity of planting. The protruding seedling picking device was used in the seedling picking process to protect the integrity of the potted seedling matrix. Based on the kinematic mechanism analysis of potted vegetable seedling transplanting mechanism with punching hole, the optimization design software was developed and the parameter optimization design was completed. The virtual simulation experiment and a series of bench tests of transplanting mechanism were carried out. The attitude of key positions such as seedling picking, punching and planting was analyzed. Trajectory and attitude verification experiments showed that the specific trajectory and attitude formed by the mechanism could complete the process of seedling picking, transporting, punching and planting in turn. The seedling picking experiment showed that the process seedling picking was realized and the integrity of potted vegetable seedlings matrix was effectively ensured.

**Key words:** planting machinery; potted vegetable seedlings; transplanting mechanism with punching hole; exploring

收稿日期: 2019-09-30 修回日期: 2019-11-04

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2017YFD0700800)、国家自然科学基金项目(51875531)、东农学者计划青年才俊项目(18QC20)和北方寒地现代农业装备技术重点实验室开放项目(KF18-04)

**作者简介:** 周脉乐(1989—),男,讲师,博士,主要从事农业机械设计与优化研究,E-mail: zhoumaile@126.com

**通信作者:** 尹大庆(1970—),男,副教授,博士,主要从事农业机械设计与应用研究,E-mail: 63900962@qq.com

## 0 引言

蔬菜钵苗移栽是将带有独立钵基质的蔬菜幼苗移栽到温室或大田,可大幅提高蔬菜幼苗抵御寒冷、洪涝、干旱、盐碱和病虫害的能力。蔬菜钵苗移栽要求移栽机构实现特定的轨迹和位姿,以完成取苗、输送、打孔和栽植等动作<sup>[1-2]</sup>。市场上应用较多的移栽装备多采用机电液一体化技术,由人工(半自动)或装备(全自动)完成取苗、喂苗,移栽效率一般为30~60株/(min·行)<sup>[3-6]</sup>。KUMAR等<sup>[7]</sup>设计了一种方形基质的全自动蔬菜移栽机,效率达30~50株/(min·行)。GUTIÉRREZ等<sup>[8]</sup>设计了一种膜上草莓移栽机,并配置了破膜装置。日本井关农机株式会社生产了PVPHR2型蔬菜移栽机,采用空间七连杆机构完成蔬菜移栽所需的轨迹和位姿。中国对蔬菜钵苗移栽机械的研究较多,笔者曾提出一种回转式扎穴移栽机构,采用杆机构完成扎穴动作,振动大,且穴口不对称,影响栽植直立度<sup>[9]</sup>。周梅芳等<sup>[10]</sup>设计了一种花卉穴盘苗取栽一体式移栽机构,栽植成功率可达70株/min。孙良等<sup>[11]</sup>针对节曲线的凸性判别对不等速行星轮系进行分析,并以水稻钵苗移栽机构为例完成了机构设计。王蒙蒙等<sup>[12]</sup>提出了一种曲柄摆杆式夹苗机构。许春林等<sup>[13]</sup>组合不等速行星轮系和平面杆机构设计了一种草莓钵苗移栽机构,栽植成功率可达85%。李华等<sup>[14]</sup>提出了一种齿轮-滑道式取苗机构,并进行了运动学分析。童俊华等<sup>[15]</sup>针对移栽后穴盘内基质残留较多问题设计了一种指铲式钵苗基质抓取执行器。俞高红等<sup>[16]</sup>以水稻钵苗为移栽对象,设计了一种夹钵式移栽机构并完成了取苗试验。JIN等<sup>[17]</sup>结合偏心齿轮和不完全非圆齿轮行星轮系设计了一种单行全自动移栽装置。赵匀等<sup>[18]</sup>开发了探入式番茄钵苗移栽机构,栽植优良率为59.4%。LIU等<sup>[19]</sup>基于零速栽植设计了一种多杆式穴盘苗栽植机构。党玉功等<sup>[20]</sup>通过对钵苗力学性能进行分析,设计了一种四连杆取投苗机构并完成了取苗和投苗试验。孙良等<sup>[21]</sup>设计了一种非圆齿轮-连杆组合传动式蔬菜钵苗移栽机构,可实现取栽一体式蔬菜钵苗移栽。纵观国内外移栽机构研究现状,多数采用两套机构分别完成钵苗移栽的取苗和栽植过程,结构复杂,且移栽机构不能同时实现打孔与移栽过程。本研究通过构型分析和优化设计,提出一种探出式蔬菜钵苗打孔移栽机构<sup>[22]</sup>,一个机构完成蔬菜钵苗移栽所需的取苗、输送、打孔和栽植等过程。

## 1 工作机理与运动学分析

### 1.1 工作机理

探出式蔬菜钵苗打孔移栽机构由5个非圆齿轮组成的不等速行星轮系、移栽臂和打孔器组成(如图1所示),其中非圆太阳轮固定在机架上,非圆中间轮I和非圆中间轮II同轴固接且铰接在行星架上,非圆行星轮I和非圆行星轮II同轴分别铰接在行星架上,非圆太阳轮与非圆中间轮I相互啮合转动,非圆中间轮I和非圆行星轮I相互啮合转动,非圆中间轮II和非圆行星轮II相互啮合转动,移栽臂固接在非圆行星轮I上,打孔器固接在非圆行星轮II上。工作过程中,驱动非圆主动轮匀速转动,行星架与驱动非圆从动轮固接,逆时针变速转动(由驱动非圆齿轮副驱动),非圆太阳轮与机架固定不动,非圆中间轮I与非圆太阳轮啮合相对行星架逆时针转动,非圆中间轮II随非圆中间轮I一起相对行星架转动,非圆行星轮I与非圆中间轮I啮合相对行星架顺时针转动,非圆行星轮II与非圆中间轮II啮合相对行星架顺时针转动,通过非圆齿轮的不等速传动,与非圆行星轮I固接的移栽臂形成特定的轨迹和位姿以完成取苗、输送和栽植过程,与非圆行星轮II固接的打孔器形成特定的轨迹和位姿以完成打孔过程。

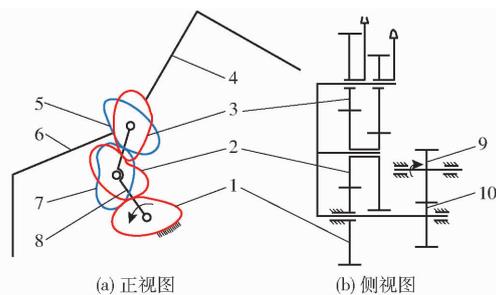


图1 探出式蔬菜钵苗打孔移栽机构原理图

Fig. 1 Mechanism schematic of potted vegetable seedling transplanting mechanism with punching hole

1. 非圆太阳轮 2. 非圆中间轮 I 3. 非圆行星轮 I 4. 移栽臂
5. 非圆行星轮 II 6. 打孔器 7. 非圆中间轮 II 8. 行星架 9. 驱动非圆主动轮 10. 驱动非圆从动轮

在移栽作业时,打孔器和移栽臂交替完成打孔和移栽过程,即打孔器在下一株蔬菜栽植位置完成打孔过程,移栽臂完成当前一株蔬菜的移栽过程,两个过程交替进行,且先完成打孔(下一株)后完成移栽(当前一株),保证蔬菜幼苗栽植的时序。移栽臂在取苗时,取苗针探出并沿穴盘侧壁进入蔬菜钵苗基质夹取蔬菜钵苗,实现幼苗与穴盘分离的同时保护基质的完整性。

### 1.2 运动学模型建立

笔者在优化设计回转式扎穴移栽机构时,建立了系统的回转式移栽机构的运动学理论模型<sup>[9]</sup>,文献中所述运动学理论模型中非圆齿轮不等速轮系部分同样适用于探出式打孔移栽机构。不同之处在于,回转式扎穴移栽机构采用平面杆机构完成破膜和扎穴过程,而本研究所设计的探出式打孔移栽机构通过非圆齿轮不等速传动,由固接在非圆行星轮 II 上的打孔器完成打孔过程。运动学分析如下:假定所有转角逆时针转动为正,顺时针转动为负。驱动非圆齿轮副将运动传递给行星架,行星架逆时针转动,非圆太阳轮固定不动,非圆中间轮 II 随非圆中间轮 I 一起相对行星架逆时针转动。历经一个工作周期,非圆中间轮 II (非圆中间轮 I) 相对行星架转过  $2\pi$ ,假设某一时刻,行星架由初始位置转过  $\varphi$  (图 2 虚线所示位置),非圆中间轮 II 由初始位置相对行星架转过  $\varphi_{2H}$  (与非圆中间轮 I 的相对转角一致),非圆行星轮 II 由初始位置相对行星架顺时针转过  $\varphi_{3H}$ ,有

$$\varphi_{3H} = \sum_{j=\varphi_{20}-\varphi_{2H}}^{\varphi_{20}} \frac{r_2(j)}{r_3(j)} \Delta\varphi_{2H}(j) \quad (1)$$

式中  $\varphi_{20}$ ——非圆中间轮 II 与非圆行星轮 II 在初始啮合点处非圆中间轮 II 对应极角  
 $r_2$ ——非圆中间轮 II 和非圆行星轮 II 对应节曲线的极径  
 $r_3$ ——非圆行星轮 II 和非圆行星轮 II 对应节曲线的极径  
 $\Delta\varphi_{2H}$ ——非圆中间轮 II 在当前啮合位置相对行星架的微小转角

打孔器折点  $F$  的位置为

$$\begin{cases} x_F = x_{O_3} + L_{O_3F} \cos(\varphi_H + \varphi_{3H} + \alpha) \\ y_F = y_{O_3} + L_{O_3F} \sin(\varphi_H + \varphi_{3H} + \alpha) \end{cases} \quad (2)$$

其中  $\varphi_H = \varphi_{H0} + \varphi$  (3)

式中  $\alpha$ ——打孔器相对非圆行星轮 II 的初始安装角  
 $\varphi_H$ ——行星架转角  
 $(x_{O_3}, y_{O_3})$ ——非圆行星轮转动中心坐标  
 $L_{O_3F}$ ——打孔器折点  $F$  到非圆行星轮转动中心的距离  
 $\varphi_{H0}$ ——行星架的初始角度  
 $\varphi$ ——行星架转过角度

打孔器尖点  $G$  的位置为

$$\begin{cases} x_G = x_F + L_{FG} \cos(\varphi_H + \varphi_{3H} + \alpha + \beta) \\ y_G = y_F + L_{FG} \sin(\varphi_H + \varphi_{3H} + \alpha + \beta) \end{cases} \quad (4)$$

式中  $\beta$ ——打孔器折角  
 $L_{FG}$ ——打孔器折点  $F$  到打孔器尖点  $G$  的距离

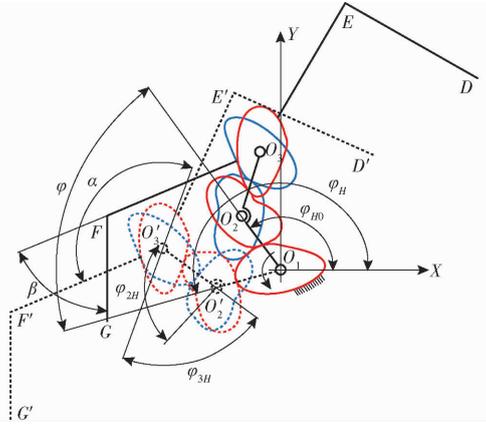
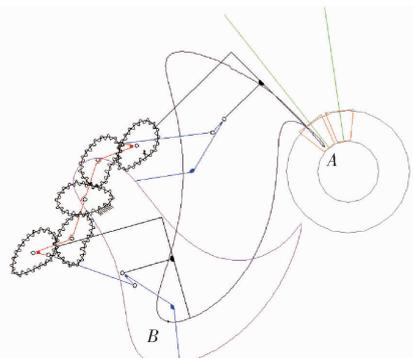


图 2 移栽机构运动学分析

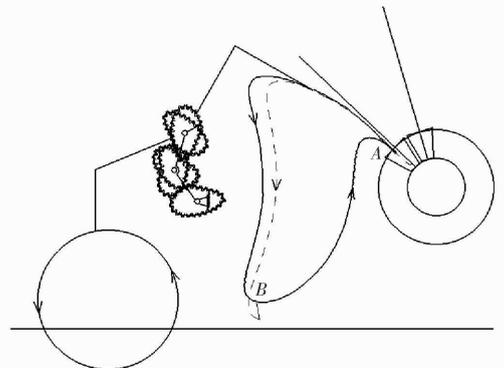
Fig. 2 Kinematic analysis of transplanting mechanism

### 2 轨迹与位姿分析

探出式蔬菜钵苗打孔移栽机构依次完成取苗、输送、打孔和栽植等过程,取苗装置在取苗位置 ( $A$  点) 探出夹取钵苗基质,在栽植位置 ( $B$  点) 收回并释放钵苗基质以完成栽植动作,  $AB$  段实现输送过程,  $BA$  段完成复位过程,其相对运动轨迹如图 3 所示。图 3a 所示是文献[9]中的回转式扎穴移栽机构的相对运动轨迹,图 3b 所示是本文提出了探出式打孔移栽机构的相对运动轨迹。对比可以看出,两种机构移栽臂的相对运动轨迹均为鹰嘴型轨迹,不



(a) 回转式扎穴移栽机构



(b) 探出式打孔移栽机构

图 3 相对运动轨迹对比分析

Fig. 3 Contrastive analysis diagram of relative motion trajectory

同之处在于回转式扎穴移栽机构的复杂轨迹与位姿完全由不等速行星轮系形成,而本研究的相对运动轨迹中实线部分为移栽臂随不等速行星轮系运动形成的轨迹,虚线部分为取苗装置探出后形成的轨迹(一个工作周期中,取苗装置在取苗位置到栽植位置探出一定距离)。本研究取苗位置进入穴盘的部分轨迹由探出式夹苗装置形成,使得夹苗阶段移栽臂转角更小,有利于保护苗钵基质的完整性。两机构对应打孔过程的相对运动轨迹也不同,回转式扎穴移栽机构的打孔轨迹为靴型轨迹,本研究打孔器形成似余摆线的绝对运动轨迹,使所成型的穴口沿移栽机前进方向对称,打孔后土壤回流均匀,有利于保证所栽植蔬菜幼苗的直立性。

探出式蔬菜钵苗打孔移栽机构的绝对运动轨迹如图4所示。移栽臂绝对轨迹中实线部分为移栽臂随不等速行星轮系运动形成的轨迹,虚线部分为夹苗装置探出后形成的轨迹。对比可以发现,回转式扎穴移栽机构形成非对称穴口,而本研究打孔器形成似余摆线的绝对运动轨迹,使所成型的穴口沿移栽机前进方向对称,打孔后土壤回流均匀,有利于保证所栽植蔬菜幼苗的直立性。

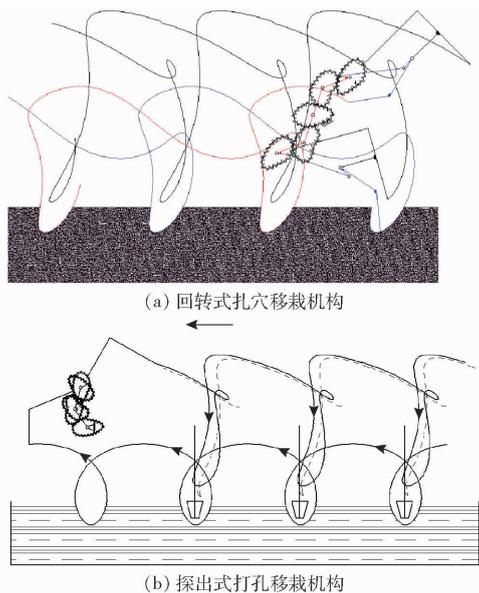


图4 绝对运动轨迹对比分析

Fig.4 Contrastive analysis diagrams of absolute motion trajectory

### 3 参数优化与虚拟仿真

探出式蔬菜钵苗打孔移栽机构的参数优化是多目标、多参数、强耦合性的复杂优化问题,笔者在运动学理论分析的基础上,开发了探出式蔬菜钵苗打孔移栽机构的优化设计软件(登记号:2018SR174511),如图5所示。优化设计软件包括相对运动模块和绝对运动模块等,可以快速而精准地计算出不等速轮系的传动比曲线以及移栽机构的轨迹与位姿。结合蔬菜幼苗移栽农艺,采用参数导

引启发式优化算法,得到一组满足蔬菜钵苗移栽要求的机构参数: $r_1 = 26 \text{ mm}$ ,  $\varphi_1 = 18.5^\circ$ ,  $r_2 = 45 \text{ mm}$ ,  $\varphi_2 = 32^\circ$ ,  $r_3 = 72.5 \text{ mm}$ ,  $\varphi_3 = 77^\circ$ ,  $r_4 = 43.8 \text{ mm}$ ,  $\varphi_4 = 106^\circ$ ,  $r_5 = 16.8 \text{ mm}$ ,  $\varphi_5 = 136^\circ$ ,  $r_6 = 28.5 \text{ mm}$ ,  $\varphi_6 = 166^\circ$ ,  $r_7 = 46.1 \text{ mm}$ ,  $\varphi_7 = 213^\circ$ ,  $r_8 = 41.8 \text{ mm}$ ,  $\varphi_8 = 245^\circ$ ,  $r_9 = 69.6 \text{ mm}$ ,  $\varphi_9 = 245^\circ$ ,  $r_{10} = 32.4 \text{ mm}$ ,  $\varphi_{10} = 257^\circ$ ,  $r_{11} = 15.3 \text{ mm}$ ,  $\varphi_{11} = 312^\circ$ ,  $r_{12} = 26 \text{ mm}$ ,  $\varphi_{12} = 336^\circ$ ,  $\varphi_{H0} = 126^\circ$ ,  $\delta_0 = -55.5^\circ$ ,  $S = 185$ ,  $H_1 = 138 \text{ mm}$ ,  $\alpha_0 = -52^\circ$ ,  $H = 250 \text{ mm}$ ,  $n = 2$ ,  $\beta = 78.5^\circ$ ,  $D = 183 \text{ mm}$ ,  $\gamma_0 = 154^\circ$ ,  $L_s = 84 \text{ mm}$ ,  $A = 25.5 \text{ mm}$ ,  $E = 0.2$ ,  $\theta_0 = 80^\circ$ 。机构参数含义如下: $r_i$  ( $i = 1, 2, \dots, 12$ )为非圆齿轮节曲线控制多边形顶点的极径; $\varphi_i$  ( $i = 1, 2, \dots, 12$ )为非圆齿轮节曲线控制多边形顶点的极角; $\delta_0$ 为移栽臂相对非圆行星轮 I 的初始安装角; $S$ 为非圆行星轮转动中心至移栽臂尖点的距离; $H_1$ 为非圆行星轮转动中心至取苗装置探出轴线的距离; $\alpha_0$ 为行星架的折角; $H$ 为相邻穴口中心的距离; $n$ 为驱动非圆齿轮的阶数; $D$ 为非圆行星轮转动中心至打孔器尖点的距离; $\gamma_0$ 为打孔器相对非圆行星轮 II 的初始安装角; $L_s$ 为打孔器折点至尖点的距离; $A$ 为驱动非圆轮的中心距; $E$ 为驱动非圆轮的离心率; $\theta_0$ 为驱动非圆主动轮的初始安装角。

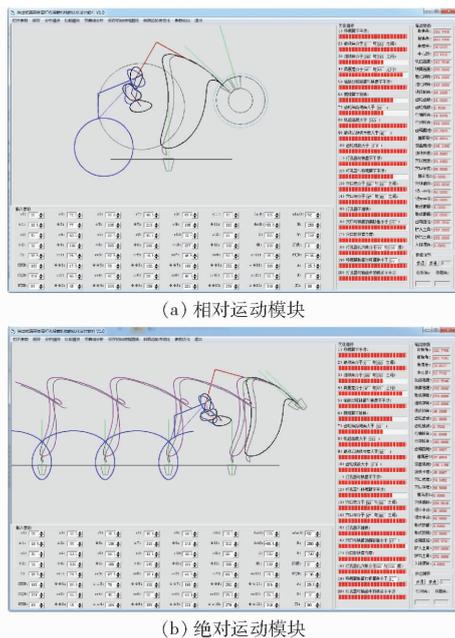


图5 探出式蔬菜钵苗打孔移栽机构的优化设计软件界面  
Fig.5 Interface of optimum design software of potted vegetable seedling transplanting mechanism

该参数下移栽机构对应的传动比曲线如图6所示。随行星架转角变化,各齿轮间传动比曲线呈现复杂的变化趋势,同时出现多个波峰和波谷。由复杂的传动比曲线也可看出,探出式蔬菜钵苗打孔移栽机构特定轨迹与位姿所要求的不等速传动比极其复杂。纵观该组参数下的各传动比曲线,移栽机构

符合钵苗移栽要求的不等速传动规律<sup>[23]</sup>。根据优化出的机构参数,完成了各零部件模型的建立,并根据初始位置对应的转角关系装配成探出式蔬菜钵苗打孔移栽机构的虚拟样机。在 ADAMS 软件中完成了移栽机构的运动仿真,如图 7 所示。在一个工作周期中(行星架由初始位置转过 360°),行星架由初始位置转过 102°(移栽臂处于输送阶段)打孔器开始入土,开始在下一株幼苗栽植位置打孔;行星架转过 112°时(打孔器处于打孔阶段),移栽臂开始推苗,在当前栽植位置完成栽植过程(打孔器在下一株幼苗栽植位置打孔);行星架转过 235°(移栽臂处于复位阶段),打孔器出土,在下次栽植位置完成打孔过程;行星架转过 275°(打孔器处于空运行阶段),移栽臂运动至取苗位置,夹苗装置探出夹秧针夹取钵基质;行星架转过 311°时(打孔器处于空运行阶段),移栽臂夹取蔬菜钵苗后将钵苗与穴盘完全分离,准备进入输送阶段;行星架转过 360°时,移栽机构回到初始位置。仿真结果表明:所设计的移栽机构可实现取苗、输送、打孔和栽植等过程,且打孔与移栽过程交替进行,可以在当前穴口完成栽植过程,同时打孔器在下一株幼苗需要栽植的位置完成打孔过程。

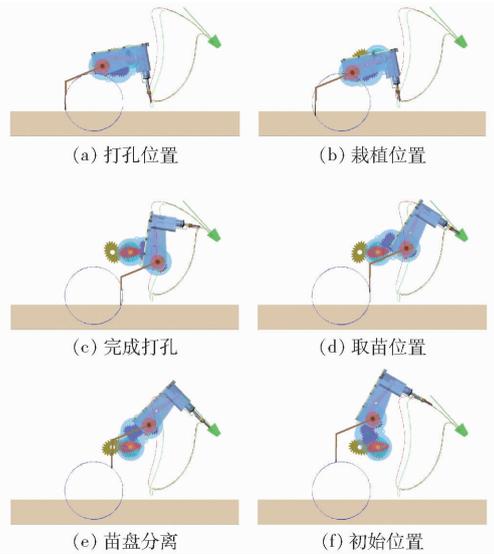


图 7 虚拟运动仿真

Fig. 7 Virtual prototype

变速移箱机构<sup>[24]</sup>(取苗阶段移箱速度相对较慢,输送、打孔和栽植等阶段移箱速度较快),有利于实现幼苗与穴盘分离的同时保护钵基质的完整性。在进行轨迹与位姿验证试验时,采用高速摄影技术及相关软件分析移栽机构在高速运转时的轨迹与位姿。为了防止秧箱造成视线阻碍,进行高速摄影试验时,暂时拆下秧箱,仅分析移栽机构的轨迹与位姿。试验表明:在高速运转的情况下,探出式蔬菜钵苗打孔移栽机构运转平稳,振动小,移栽臂实现鹰嘴型相对运动轨迹,打孔器实现似圆形相应运动轨迹。优化软件结果、虚拟仿真结果与台架试验结果基本一致(如图 8 所示),相互验证了理论分析、优化设计软件、虚拟仿真和台架试验的正确性。

在试验台架上完成了取苗试验(如图 9 所示),分别针对番茄幼苗和辣椒幼苗完成了取苗试验,所用穴盘为横向 6 穴,穴口表面尺寸为 40 mm × 40 mm,穴盘深度为 45 mm。取苗试验表明:所开发的探出式蔬菜钵苗打孔移栽机构可以实现幼苗与穴盘的分离(如图 10 所示),并能很好地保护钵基质的完整性。

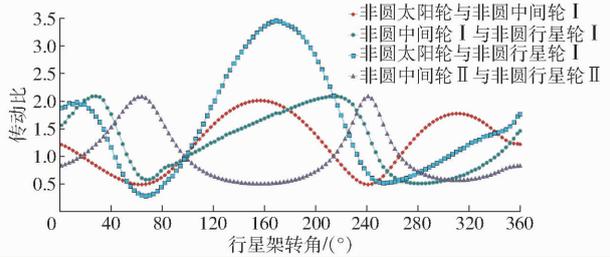


图 6 传动比曲线

Fig. 6 Transmission ratio curves

### 4 台架试验

开发了探出式蔬菜钵苗打孔移栽机构的试验台架系统,并完成了轨迹与位姿验证试验和取苗试验。试验台架通过变频器改变驱动电机的转速,可实现移栽机构 0~400 株/min 无级调速。移箱系统采用

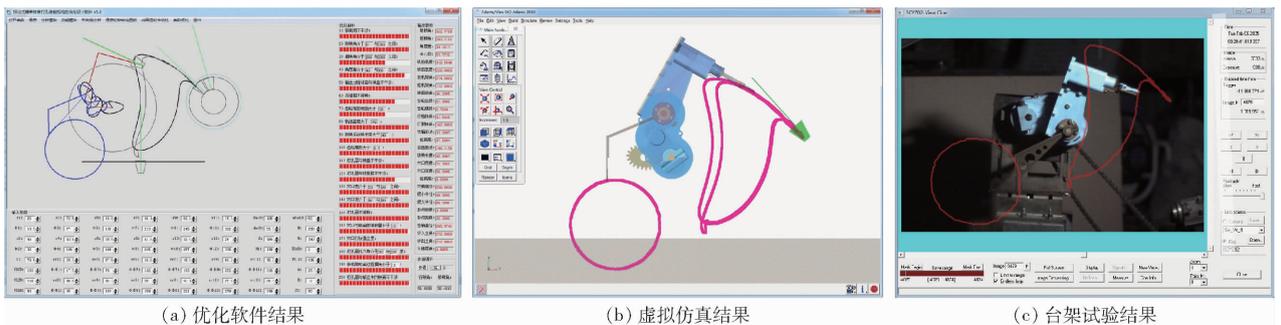


图 8 轨迹与位姿对比

Fig. 8 Trajectory and attitude contrast charts



图9 取苗试验

Fig.9 Seedling picking test

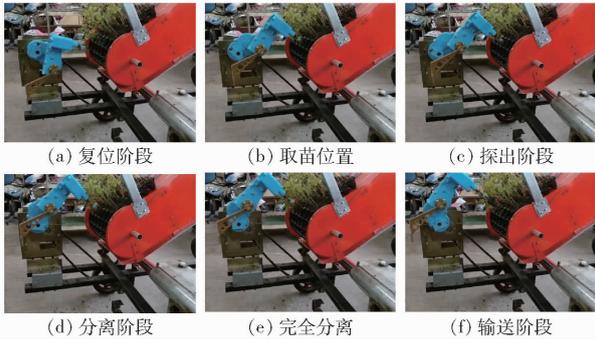


图10 蔬菜钵苗与穴盘分离过程

Fig.10 Separation of potted vegetable seedlings from pot plates

## 5 结论

(1) 提出了一种探出式蔬菜钵苗打孔移栽机构,可完成取苗、输送、打孔和栽植动作,打孔与移栽过程交替进行,保证了蔬菜钵苗栽植先打孔后栽植的时序。取苗过程采用探出式夹苗装置,有利于保护蔬菜钵苗基质的完整性。

(2) 以运动学理论模型为基础,开发了探出式蔬菜钵苗打孔移栽机构的优化设计软件,软件包含初始位置模块、相对运动模块、绝对运动模块等,可直观地显示移栽机构的轨迹与位姿以及复杂的不等速传动比曲线。通过参数导引启发式优化算法,得到了一组满足蔬菜钵苗移栽要求的机构参数,并分析了其不等速传动比。

(3) 开发了试验系统,并完成轨迹与位姿验证试验,优化软件结果、虚拟仿真结果和台架试验结果基本一致,相互验证了理论分析、虚拟仿真和台架试验的正确性。

(4) 基于变速移箱系统,在试验台架上完成了取苗试验,结果表明,所开发的移栽机构可依次完成取苗、输送、打孔和栽植等动作,先打孔、后栽植,探出式夹苗装置可有效保护钵苗基质的完整性。

## 参 考 文 献

- [1] 于晓旭,赵匀,陈宝成,等. 移栽机械的发展现状与展望[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(8):44-53.  
YU Xiaoxu,ZHAO Yun,CHEN Baocheng, et al. Current situation and prospect of transplanter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(8):44-53. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20140808&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140808&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.08.008. (in Chinese)
- [2] 吕志军,单伊尹,王杰,等. 蔬菜移栽装备研究现状和钵苗移栽装备展望[J]. 中国农机化学报,2017,38(11):30-34.  
LÜ Zhijun,SHAN Yiyin,WANG Jie, et al. Research progress of vegetable transplanting machine and prospects of seeding-picking machinery of transplanter[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2017,38(11):30-34. (in Chinese)
- [3] PRASANNA K G V,RAHEMAN H. Vegetable transplanters for use in developing countries—a review[J]. International Journal of Vegetable Science,2008,14(3):232-255.
- [4] 于向涛,胡良龙,胡志超,等. 我国旱地移栽机械概况与发展趋势[J]. 安徽农业科学,2012,40(1):614-616.  
YU Xiangtao,HU Lianglong,HU Zhichao, et al. Development trend and general situation of nonirrigated farmland transplanting mechanization in China[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences,2012,40(1):614-616. (in Chinese)
- [5] 王晓东,封俊. 国内外膜上移栽机械化的发展状况[J]. 中国农机化学报,2005,26(3):25-28.  
WANG Xiaodong,FENG Jun. State and development of transplanting mechanization with mulch film at home and abroad[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2005,26(3):25-28. (in Chinese)
- [6] 王帅. 育苗移栽机具的发展现状及趋势[J]. 农业科技与装备,2019(2):58-59.  
WANG Shuai. Development situation and trend of seedling transplanting machine[J]. Agricultural Science & Technology and Equipment,2019(2):58-59. (in Chinese)
- [7] KUMAR G V P,RAHEMAN H. Automatic feeding mechanism of a vegetable transplanter[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering,2012,5(2):20-27.
- [8] GUTIÉRREZ C,SERWATOWSKI R,GRACIA C, et al. Design building and testing of a transplanting mechanism for strawberry plants of bare root on mulched soil[J]. Spanish Journal of Agricultural Research,2009,7(4):791-799.
- [9] 周脉乐. 回转式膜上辣椒钵苗移栽机构的优化设计与试验研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2017.  
ZHOU Maile. Optimized design and experimental study of the rotary pepper pot seeding transplanting mechanism on agricultural plastic film[D]. Harbin:Northeast Agricultural University,2017. (in Chinese)
- [10] 周梅芳,徐建军,童俊华,等. 花卉穴盘苗取栽一体式自动移栽机构设计与试验[J]. 农业工程学报,2018,34(20):44-51.

- ZHOU Meifang, XU Jianjun, TONG Junhua, et al. Design and experiment of integrated automatic transplanting mechanism for taking and planting of flower plug seedlings[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(20): 44-51. (in Chinese)
- [11] 孙良, 徐亚丹, 黄恒敏, 等. 基于节曲线凸性判别的行星轮系移栽机构解析[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(12): 83-92. SUN Liang, XU Yadan, HUANG Hengmin, et al. Solution and analysis of transplanting mechanism with planetary gear train based on convexity of pitch curve[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(12): 83-92. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20181210&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20181210&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.12.010. (in Chinese)
- [12] 王蒙蒙, 宋建农, 刘彩玲, 等. 蔬菜移栽机曲柄摆杆式夹苗机构的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(14): 49-57. WANG Mengmeng, SONG Jiannong, LIU Cailing, et al. Design and experiment of crank rocker type clamp seedlings mechanism of vegetable transplanter[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(14): 49-57. (in Chinese)
- [13] 许春林, 吕志军, 辛亮, 等. 全自动草莓钵苗移栽机构优化设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(8): 97-106. XU Chunlin, LÜ Zhijun, XIN Liang, et al. Optimization design and experiment of full-automatic strawberry potted seedling transplanting mechanism[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8): 97-106. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20190811&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190811&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.08.011. (in Chinese)
- [14] 李华, 曹卫彬, 李树峰, 等. 辣椒穴盘苗自动取苗机构运动学分析与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(23): 20-27. LI Hua, CAO Weibin, LI Shufeng, et al. Kinematic analysis and test on automatic pick-up mechanism for chili plug seedling[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(23): 20-27. (in Chinese)
- [15] 童俊华, 石虎峰, 武传宇, 等. 穴盘移栽指铲式末端执行器苗钵基质抓取仿真与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(8): 107-116. TONG Junhua, SHI Hufeng, WU Chuanyu, et al. Simulation and test of seedling pot grabbing by spade end-effector[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8): 107-116. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20190812&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190812&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.08.012. (in Chinese)
- [16] 俞高红, 金也, 常数数, 等. 夹钵式水稻钵苗移栽机构设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(7): 100-108. YU Gaohong, JIN Ye, CHANG Shushu, et al. Design and test of clipping-plug type transplanting mechanism of rice plug-seedling[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 100-108. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20190710&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190710&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.07.010. (in Chinese)
- [17] JIN Xin, LI Daoyi, MA Hao, et al. Development of single row automatic transplanting device for potted vegetable seedlings[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2018, 11(3): 67-75.
- [18] 赵匀, 张卫星, 辛亮, 等. 探入式番茄钵苗移栽机构设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(1): 105-112. ZHAO Yun, ZHANG Weixing, XIN Liang, et al. Design and experiment of extensible potted tomatoes seedling transplanting mechanism[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1): 105-112. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20190111&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190111&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.01.011. (in Chinese)
- [19] LIU J D, CAO W B, TIAN D Y, et al. Kinematic analysis and experiment of planetary five-bar planting mechanism for zero-speed transplanting on mulch film[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2016, 9(4): 84-91.
- [20] 党玉功, 金鑫, 李衡金, 等. 单自由度四连杆取投苗机械臂设计[J]. 农业工程学报, 2019, 35(14): 39-47. DANG Yugong, JIN Xin, LI Hengjin, et al. Design of single-degree-of-freedom four-bar seedling-taking and throwing manipulator[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(14): 39-47. (in Chinese)
- [21] 孙良, 沈嘉豪, 周誉株, 等. 非圆齿轮-连杆组合传动式蔬菜钵苗移栽机构设计[J]. 农业工程学报, 2019, 35(10): 26-33. SUN Liang, SHEN Jiahao, ZHOU Yuzhu, et al. Design of non-circular gear linkage combination driving type vegetable pot seedling transplanting mechanism[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(10): 26-33. (in Chinese)
- [22] 东北农业大学. 回转式膜上扎穴移栽机构: 201610134160.4[P]. 2017-09-22.
- [23] 赵雄. 二阶非圆齿轮行星轮系钵苗移栽机取苗机构优化设计与试验研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2014. ZHAO Xiong. Optimal design and experiment research of planetary gear train with two-order non-circular gears seedling pick-up mechanism on seedling transplanter[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2014. (in Chinese)
- [24] ZHOU Maile, HUA Zhengyu, WANG Jingyuan, et al. New type of transverse moving box mechanism for pot seedling transplanting machine[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2018, 11(2): 70-75.